

GFZ LECTURES

Veränderungen von Hochwässern im Zeichen des Globalen Wandels

von Günter Blöschl





GFZ LECTURES

Wissenschaft lebt vom Dialog. Eine Vielzahl von Symposien, Kongressen und weiteren wissenschaftlich ausgerichteten Veranstaltungen, die jährlich am Deutschen GeoForschungszentrum GFZ stattfinden, trägt diesem Anspruch Rechnung. Mit den GFZ Lectures möchten wir herausragenden Gastvorträgen Nachhaltigkeit und über die Veranstaltungen hinausgehende Strahlkraft verleihen.

IMPRESSUM:

Herausgeber:
Helmholtz-Zentrum Potsdam – Deutsches GeoForschungszentrum GFZ
Telegrafenberg
14473 Potsdam
Tel.: +49 331 288 0
www.gfz-potsdam.de

Text: Günter Blöschl
Verantwortlich i.S.d.P.: Franz Ossing
Layout: Grit Schwalbe, GFZ
Druck: Brandenburgische Unidruckerei, Potsdam-Golm
1. Auflage, 2015

Vorwort

Wissenschaft – Öffentlichkeit – Medien

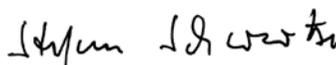
Neben Stürmen stellen Hochwasser die häufigsten und schadensträchtigsten Katastrophenereignisse in Deutschland dar. Der höchste ökonomische Schaden durch ein Naturereignis in Deutschland wurde durch das Elbe- und Donauhochwasser im August 2002 verursacht und lag bei 11,8 Milliarden Euro. Nicht nur Rückversicherungsgesellschaften wie die Munich Re gehen davon aus, dass der globale Wandel einen weiteren Anstieg von Hochwasserereignissen erwarten lässt.

Ist dem tatsächlich so? Günter Blöschl, ein weltweit anerkannter Forscher auf diesem Gebiet, zeichnet ein differenziertes Bild, das solche pauschalen Abschätzungen relativiert. Die Untersuchung der Hochwasserereignisse in Europa verdeutlicht, dass eine zu regionale Betrachtung dem Charakter solcher Naturkatastrophen nicht gerecht wird: sowohl die verursachenden Wettersysteme als auch die Rückwirkungen von Hochwassermanagementsystemen reichen stets über die betroffenen Regionen hinaus. Anders ausgedrückt: Hochwasser sind Naturereignisse, die historisch nicht gleichmäßig verteilt vorkommen, sondern sich zeitlich – so Blöschl – in hochwasserarme und hochwasserreiche Perioden clustern. Hochwasser sind aber auch Resultat von menschlichen Eingriffen. Hochwassermanagement hat deshalb die Aufgabe, ein hochkomplexes System aus Klima, Vegetation, Böden, Landschaftsformen und menschlicher Aktivität darin zu überwachen und, wo möglich, zu steuern.

Günter Blöschls exzellenter Vortrag in den GFZ Lectures soll mit dieser Broschüre einem größeren Publikum zur Verfügung gestellt werden. Ein außergewöhnlicher Wissenschaftler gibt uns einen Einblick in ein hochinteressantes Fachgebiet der modernen Geowissenschaften.



Prof. Dr. Dr. h.c. Reinhard F. Hüttl
Wissenschaftlicher Vorstand



Dr. Stefan Schwartze
Administrativer Vorstand

Veränderungen von Hochwassern im Zeichen des Globalen Wandels

Vortrag von Günter Blöschl am Deutschen GeoForschungsZentrum GFZ, am 15. Oktober 2014

” *Humans have changed the way the world works. Now they have to change the way they think about it, too.* “ aus: The Economist, May 26, 2011

Kurzfassung

Die große Anzahl extremer Hochwasser in den letzten Jahren auf der ganzen Welt deutet darauf hin, dass Hochwasser an Flüssen generell zugenommen haben und in den nächsten Jahrzehnten weiter zunehmen werden. Allerdings ist dieser Befund nicht eindeutig und wird derzeit in der Literatur heftig diskutiert. Dieser Beitrag untersucht, ob sich Hochwasser in der Vergangenheit verändert haben und in der Zukunft verändern werden, und bespricht die treibenden Prozesse solcher Veränderungen in der Atmosphäre, den Einzugsgebieten und im Flusssystem. Rückkoppelungsprozesse im System werden für die Langfristentwicklung der Hochwasser als extrem wichtig eingestuft, einschließlich der Wechselwirkungen mit gesellschaftlichen Prozessen. Für den zukünftigen Umgang mit Hochwassern ist das integrierte Hochwasserrisikomanagement mit Schwerpunkt auf der Verringerung der Vulnerabilität der geeignete Ansatz.

1. Große Hochwasser in jüngster Zeit

Die Öffentlichkeit war in den letzten Jahren mit einer Vielzahl extremer Hochwasser rund um den Globus konfrontiert. Die Elbe und Donau wurden im Juni 2013 durch Überflutungen getroffen – nur 11 Jahre nach einem ebenso

großen Jahrhunderthochwasser – der Balkan im Mai 2014, Großbritannien im Winter 2013/14. Die Liste der Extremhochwasser in der jüngsten Vergangenheit ist lang, die Schäden und die Betroffenheit der Bevölkerung enorm. Überflutungen können die verschiedensten Ursachen haben (Viglione and Rogger, 2015). Küstenhochwasser werden zum Beispiel durch Erdbeben im Ozean ausgelöst – Tsunami wie 2004 in Indonesien und 2011 in Japan. Weniger bekannt ist, dass im Jahr 365 viele Städte am östlichen Mittelmeer und 1755 Lissabon in ähnlicher Weise verwüstet wurden. Aber auch Stürme können Wassermassen an die Küste treiben, wie bei der sogenannten Weihnachtsflut des Jahres 1717 an der Nordseeküste von Holland bis Dänemark und beim Wirbelsturm Sandy. Flusshochwasser waren früher oft auf einen Eisstoß zurückzuführen, bei dem Eisschollen das heranströmende Wasser blockierten, wie an der Donau bei Wien im Februar 1830 (Abbildung 1). Heute lassen höhere Lufttemperaturen und Flusskraftwerke die Bildung großer Eisstöße im Mitteleuropa kaum zu. Flusshochwasser werden jetzt meist durch großräumigen Niederschlag ausgelöst, oft verbunden mit sogenannten Vb-Wetterlagen, bei denen feuchte Luft aus dem Mittelmeerraum herantransportiert wird. Auch Schneeschmelze kann dabei eine wichtige Rolle spielen. Eine andere Ursache von Hochwassern sind Überflutungen im Zusammenhang mit Stauseen. Ereignisse, die zu tragischer Berühmtheit gelangten, sind der Bruch der Staumauer von Malpasset 1959, die wegen des Aufbaus des



Abb. 1: *Beispiel für ein Hochwasser zufolge Eisstoß, Wien im März 1830.*

Wasserdruckes im Untergrund die Stabilität verlor, und die Überflutung von Vajont 1963 zufolge eines Erdbebens in den Stausee. Ähnliche Ereignisse können bei Gletscherseen auftreten. Schließlich können Überflutungen durch Sturzfluten als Folge kurzer, kleinräumiger, aber sehr intensiver Niederschläge entstehen. Im Gebirge führt dies oft zu Hangrutschungen und Muren wie die Cinque Terre-Hochwasser im Oktober 2011 in Norditalien.

In einem Erdsystem, das durch viele Aspekte des Globalen Wandels betroffen ist, stellt sich die Frage, ob die Häufung von Hochwassern in den letzten Jahren zufällig ist, oder das Ergebnis von sich systematisch verändernden Bedingungen. Dieser Beitrag widmet sich dieser Frage, speziell für den Fall von Flusshochwassern, die durch Niederschläge, eventuell mit einem Beitrag von Schnee, ausgelöst werden. Der Fokus liegt auf Europa. Besprochen wird, ob die Hochwasser in der Vergangenheit größer geworden sind (Kapitel 2), welche Rolle verschiedene Prozesse bei den langfristigen Veränderungen von Hochwasser spielen (Kapitel 3), und ob Hochwasser in der Zukunft wahrscheinlich größer werden (Kapitel 4).

Als Maßzahl für die Größe des Hochwassers wird der Abfluss verwendet, der als Produkt von Fließgeschwindigkeit und Querschnittsfläche an einem bestimmten Flussprofil definiert ist. Dies ist eine geeignete Kenngröße, da sie das Ausmaß der Überflutungen besser vergleichbar macht als der Wasserstand, unabhängig von der Querschnittsfläche an einem bestimmten Standort. Insbesondere werden der maximale Abfluss in jedem Jahr (das Jahreshochwasser) und dessen zeitliche Entwicklung über Jahrzehnte oder Jahrhunderte betrachtet.

2. Haben sich Hochwasser in der Vergangenheit verändert?

An den großen Flüssen Europas wird der Abfluss seit mehr als hundert Jahren systematisch gemessen. Daraus ergibt sich die Möglichkeit, die Messungen auszuwerten und in Hinblick auf Veränderungen der Hochwasser zu beurteilen. Ein Beispiel für einen solchen Datensatz zeigt Abbildung 2 mit dem

maximalen Abfluss in jedem Jahr seit 1828 für die Donau bei Wien. In manchen Jahren war der Spitzenabfluss relativ klein (der nicht als Hochwasser im eigentlichen Sinne zu bezeichnen ist), doch in anderen Jahren war er sehr groß und führte zu Überflutungen. Vier der größten Hochwasser sind durch rote Kreise in der Abbildung markiert, die im Juni 2013, August 2002, Juli 1954 und September 1899 aufgetreten sind. Jedes dieser vier Hochwasser wurde durch heftige Regenfälle mit maximalen Niederschlagsmengen von mehr als 300 mm (entspricht 300 l/m²) in einigen Tagen verursacht (Abbildung 3). Die Ausnahme war das Hochwasser im September 1899, bei dem der Niederschlag viel höher (über 500 mm) war, der Spitzenabfluss sich jedoch nicht viel von den anderen Ereignissen unterschied. Das lag daran, dass der Boden im September trocken war aufgrund geringer Niederschläge und hoher Verdunstung im Sommer. Ein Großteil des Niederschlages infiltrierte deshalb in den Boden, so dass der tatsächliche Abfluss von der Landoberfläche stark reduziert wurde. Eine vollkommen andere Situation lag beim Ereignis im Juni 2013 vor, bei dem die hohen Niederschläge am Alpennordrand auf eine hohe Bodenfeuchte zu Beginn des Ereignisses auftrafen (Blöschl et al., 2013a; Schröter et al. 2015), die eine Folge eines feuchten, kühlen Frühjahres war.

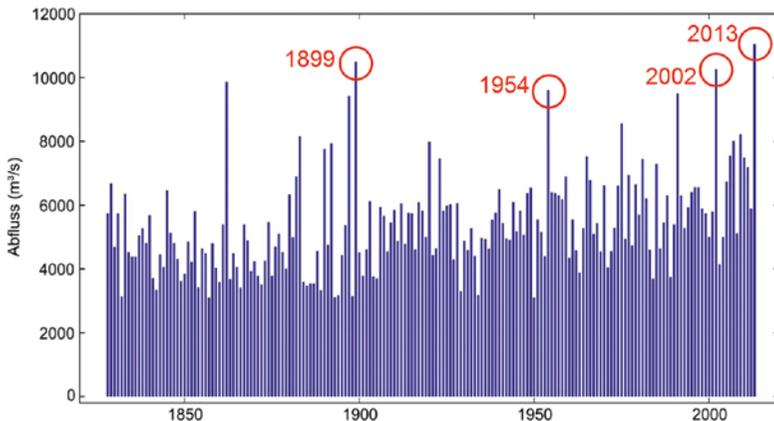


Abb. 2: Maximale jährliche Hochwasser (d. h. der größte Abfluss in jedem Jahr) für die Donau bei Wien zwischen 1828 und 2013.

Quelle: Blöschl et al. (2013b)

Dadurch trug ein großer Anteil des Niederschlages zum Hochwasser bei. Eine unwahrscheinliche – aber mögliche – Kombination des Niederschlags von 1899 mit der Bodenfeuchte von 2013 würde zu einem Hochwasser führen, das die vergangenen Ereignisse bei weitem überträfe, ein Szenario, das für den Hochwasserschutz im Auge zu behalten ist.

Daten wie solche in Abbildung 2 wurden in zahlreichen Studien auf der ganzen Welt untersucht, und in Hinblick auf Veränderungen der Hochwasser in ihrer Größe und Häufigkeit ausgewertet (z. B. Merz et al., 2014; Hall et al, 2014.). Oft steht die Frage im Vordergrund, ob ein Trend der Hochwasser vorliegt (Merz et al., 2012). Dabei werden an die Abflussdaten (wie in Abbildung 2) Regressionslinien angepasst und deren Neigung auf statistische Signifikanz geprüft. Derartige Studien zeigen in der Regel große räumliche Heterogenität, die vor allem auf lokale Prozesse der Hochwasserentstehung (siehe Kapitel 3) zurückzuführen ist. Aber es gibt auch interessante großräumige Muster. Die Auswertung in Abbildung 4 deutet darauf hin, dass sich Hochwasser auf der iberischen Halbinsel und in Nordosteuropa tendenziell

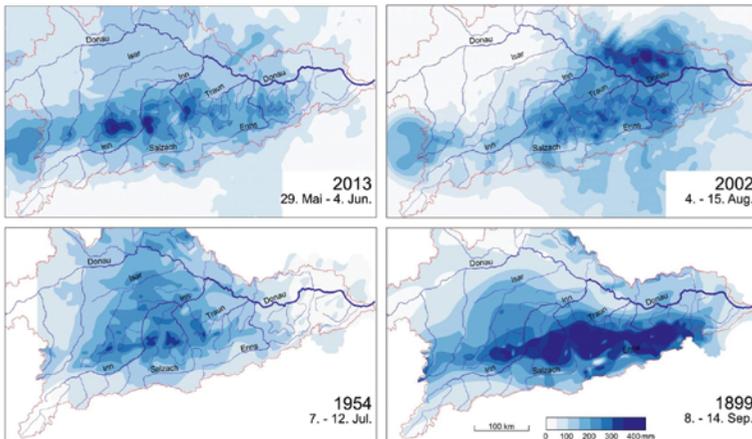


Abb. 3: Ereignisniederschläge der vier größten Hochwasser im Donaugebiet bis Wien in den letzten zwei Jahrhunderten.

Quelle: Blöschl et al. (2013a)

verringert haben (das letztere aufgrund früherer Schneeschmelze die weniger häufig mit Sommerniederschlägen zusammentrifft) und in Westeuropa tendenziell erhöht haben (aufgrund von Änderungen der Niederschläge).

Um einen Blick in die weitere Vergangenheit – die letzten 500 Jahre – zu werfen, kann auf historisches Quellenmaterial zurückgegriffen werden wie Chroniken, Zeitungen, private und amtliche Korrespondenz, Rechnungen, und Steueraufzeichnungen (z. B. Brázdil et al., 2012), das Informationen zum Zeitpunkt, den meteorologisch-hydrologischen Ursachen und den Folgen wie Todesopfer und Sachschäden enthalten kann. Hochwassermarken an Gebäuden geben Auskunft über den höchsten Wasserstand eines Hochwassers. Mittels mathematischer Modelle lässt sich näherungsweise der Abfluss rekonstruieren (z. B. Kjeldsen et al., 2014). Die weiter zurück liegende Hochwassergeschichte kann man (allerdings mit geringerer Genauigkeit) durch die Analyse von Sedimentablagerungen verfolgen (Baker et al, 2002).

Ein Beispiel für einen europäischen Überblick über historische Hochwasser in Europa gibt Abbildung 5. Die roten Farben zeigen Regionen und Zeiten, in denen Hochwasser besonders hoch oder häufig waren. Ein interessantes Ergebnis derartiger Auswertungen ist die Erkenntnis, dass Hochwasser



Abb. 4: Regionale Trends des Hochwasserabflusses in den letzten Jahrzehnten in Europa aus verschiedenen Studien und für verschiedene Zeiträume. Nach oben zeigende Pfeile bedeuten steigende Tendenz, nach unten zeigende Pfeile eine rückläufige Tendenz. Farben zeigen Regionen in Europa.
Quelle: Hall et al. (2014)

nicht gleichmäßig im Laufe der Geschichte auftreten, sondern in Clustern hochwasserarmer und hochwasserreicher Perioden (Szolgayová et al., 2014). Eine Periode mit großen Hochwassern trat etwa in der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts auf (Abbildung 5, Mitte unten). Die Ursachen der Clusterbildung sind derzeit Gegenstand wissenschaftlicher Diskussion, jedenfalls dürften sie mit der Kopplung des ozeanischen und atmosphärischen Erdsystems im Zusammenhang stehen (Pires und Perdigão, 2015).

Aus gesellschaftlicher Sicht sind aber nicht nur die Hochwasserabflüsse selbst, sondern auch die durch sie hervorgerufenen Schäden von Interesse (Merz et al., 2010; Kreibich et al., 2015). Dabei zeigt sich, dass die hochwassergefährdeten Werte (Infrastruktur, Gebäude, ...) und die Anzahl der gefährdeten Bevölkerung meist viel stärker zugenommen haben als die Hochwassergefahr selbst. Als Beispiel zeigt Abbildung 6a die Hochwasserschäden in Europa ohne Berücksichtigung von Inflation und Wertveränderungen der Infrastruktur. Diese haben nominal zugenommen. Korrigiert man sie hingegen bezüglich Inflation und Vermögenswerte (Abbildung 6b), ist keine klare Zunahme ersichtlich. Das bedeutet, dass in diesem Fall die stärkste Einflussgröße die Zunahme der Vermögenswerte in hochwassergefährdeten Gebieten ist. In ähnlicher Weise hat, etwa in vielen Teilen Afrikas, die

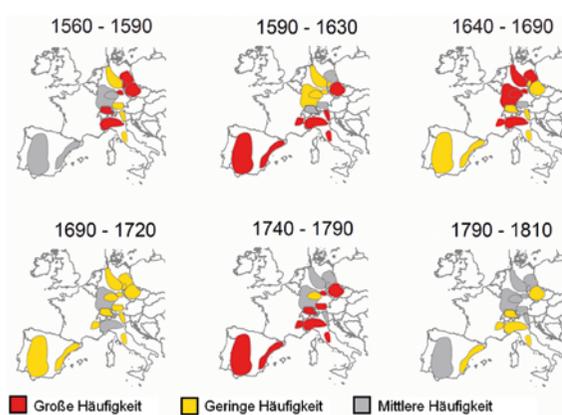


Abb. 5: Perioden mit häufigen und weniger häufigen Hochwassern in Europa zwischen 1560 und 1810. Aus Schmocker-Fackel et al. (2010).

Quelle:
Schmocker-Fackel et al. (2010)

Bevölkerungsdichte in hochwassergefährdeten Gebieten durch Migration von ländlichen in urbane Gebiete zugenommen, wodurch die Anzahl der Todesfälle zufolge Hochwasser angestiegen ist (Di Baldassarre et al., 2010). Es lässt sich also aussagen, dass sich Hochwasser in der Vergangenheit deutlich verändert haben und etwa in Nordwesteuropa in den letzten Jahrzehnten zugenommen haben. Allerdings weisen die Vermögenswerte in hochwassergefährdeten Gebieten oft eine noch prägnantere Dynamik auf, sodass die Schäden meist durch letztere dominiert werden.

3. Welche Prozesse verändern Hochwasser?

Prozesse, die Hochwasser zufolge Regen und Schneeschmelze erzeugen und beeinflussen, können in drei Bereiche unterteilt werden. Der erste ist die Atmosphäre, in der der Niederschlag entsteht und die Verdunstung und Schneeschmelze über den Energiehaushalt bestimmt. Der zweite Bereich sind die Einzugsgebiete (d. h. der Landoberfläche, die Böden und die Grundwasserleiter) in denen Regen (und eventuell Schneeschmelze) oberflächlich abfließt bzw. in den Untergrund eindringt. Der dritte Bereich ist das Flusssystem, das den lokal entstandenen Abfluss weiterleitet und akkumuliert. Die Prozesse in allen drei Bereichen wirken sich auf die Eigenschaften der Hochwasser aus. Daher können Änderungen dieser Prozesse auch zu Veränderungen in der Größe und Häufigkeit der Hochwasser führen.

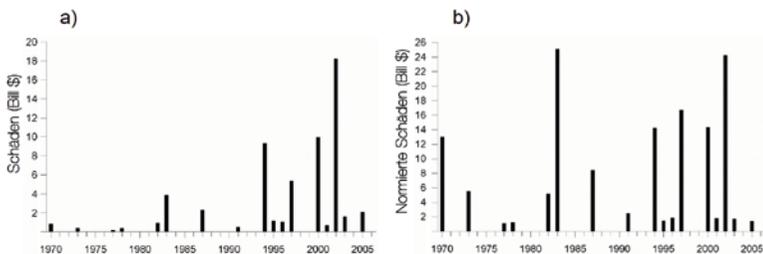


Abb. 6: Jährliche Schäden zufolge großer Hochwasserkatastrophen in Europa (a) Rohdaten. (b) Daten normiert in Hinblick auf Inflation und Vermögenswerte in den Überflutungsgebieten.

Quelle: Barredo (2009)

Atmosphäre: Der wichtigste Treiber für Veränderungen von Hochwassern sind Änderungen des Niederschlags. Diese können durch eine Verschiebung der globalen atmosphärischen Zirkulation hervorgerufen werden (Merz et al., 2014). Eine interessante Frage ist beispielsweise, ob die für die Hochwasser so gefährliche Vb Wetterlagen bereits jetzt häufiger auftreten. Bei höherer Lufttemperatur können sich aber auch lokale, konvektive Niederschläge wegen geringerer atmosphärischer Stabilität und größerer Wasserhaltekapazität erhöhen. Nach der Beziehung von Clausius-Clapeyron vergrößert sich die Wasserhaltekapazität der Atmosphäre um rund 7% pro Grad Temperaturerhöhung. Auswertungen von Niederschlagsmessungen wie in Abbildungen 7 belegen diesen grundsätzlichen Zusammenhang. Lokale, konvektive Niederschläge sind für Hochwasser in kleinen Gebieten relevant, während sich die Zirkulationsmuster stärker auf die für ganze Flussgebiete relevanten, großräumigen Niederschläge auswirken.

Erhöhungen der Lufttemperatur sind mit Veränderungen in der Energiebilanz der Landoberfläche verbunden, wodurch mehr Energie zum Schmelzen von Schnee zur Verfügung stehen kann. Dadurch werden Schneeschmelzhochwasser vergrößert und die Vorbedingungen der Bodenfeuchte im Gebiet beeinflusst. Eine Reihe von Studien haben deshalb Hochwasser nach ihren

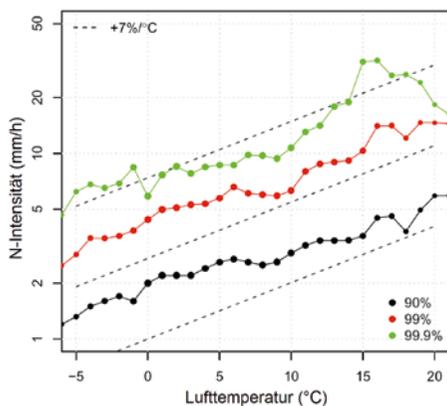
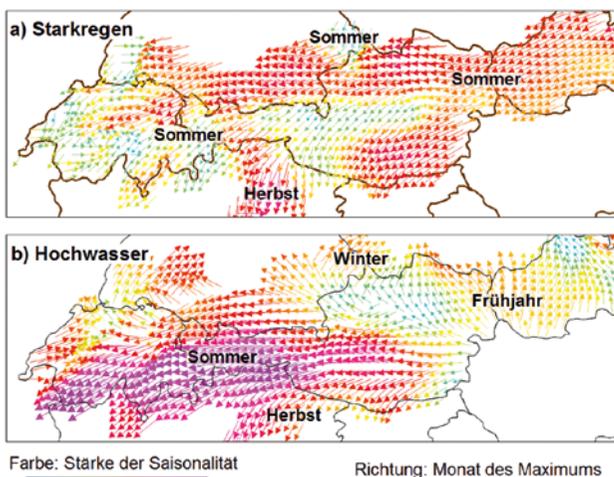


Abb. 7: Abhängigkeit des extremen Niederschlages (der in 90–99,9% der Fälle unterschritten wird) von der Lufttemperatur für Messdaten der Station Pertisau in Tirol. Zum Vergleich zeigen die strichlierten Linien eine Zunahme von 7% pro °C Lufttemperatur.

Quelle: Blöschl et al. (2011)

Entstehungsmechanismen (großräumige Niederschläge, konvektive Niederschläge, Schneeschmelze, Regen auf Schnee) klassifiziert (z. B. Merz und Blöschl, 2003) um die Rolle der einzelnen Prozesse einzuordnen. Ein einfacheres Maß der Prozessbeurteilung ist das Datum innerhalb eines Jahres in dem Hochwasser auftreten (d. h. die Saisonalität). In Abbildung 8a ist beispielsweise zu erkennen, dass die stärksten Niederschläge nördlich der Alpen im Sommer auftreten, südlich der Alpen jedoch im Herbst. Die Saisonalität des Hochwassers (Abbildung 8b) ist komplexer. Es gibt Sommerhochwasser im Bereich der Zentralalpen, aber Winterhochwasser und Frühjahrshochwasser nördlich und östlich der Alpen. Diese Unterschiede sind auf den Schneerückhalt im Winter, die Schneeschmelze und die Rolle der Bodenfeuchte zurückzuführen. Insbesondere entstehen die Winterhoch-



wasser durch vergleichsweise kleine Niederschläge aber gesättigte Böden. Änderungen in diesen Einflussgrößen führen auch zu Veränderungen in den Eigenschaften der Hochwasser selbst.

Eine derartige Auswertung zeigt Abbildung 9, in der die mittlere Saisonalität der Hochwasser für einen Längenschnitt Österreich – Slowakei unterschieden nach Dekaden aufgetragen ist. Im Zentrum des Längenschnittes traten die Hochwasser in der Dekade 1961-1970 im Sommer auf (rote Farbe), während sie in der Dekade 1991-2000 im Frühjahr (grün) und Winter (blau) auftraten. Diese Analyse eröffnet auch die interessante Möglichkeit aus den räumlichen Veränderungen (entlang eines Höhengradienten) auf die zeitlichen Veränderungen (über Dekaden) zu schließen. Während die Sommerhochwasser 1961-1970 auf einer Seehöhe von ca. 500 m auftraten, verschob sich in den folgenden Jahrzehnten das Auftreten von Sommerhochwassern auf Seehöhen von mehr als 1000 m. Dies könnte mit den erhöhten Lufttemperaturen zusammenhängen. Allerdings sind bei derartigen Auswertungen auch Veränderungen in den atmosphärischen Zirkulationsmustern zu berücksichtigen, die eine komplexe zeitliche Dynamik aufweisen.

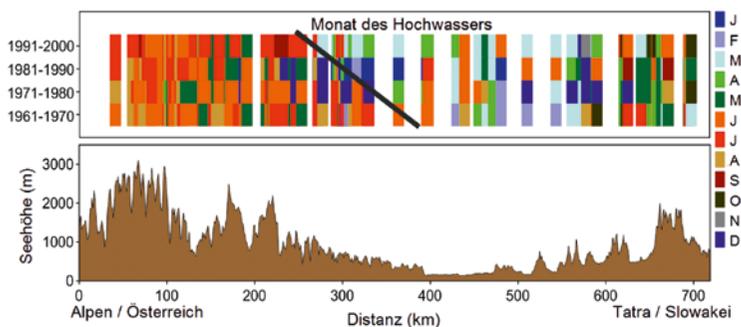


Abb. 9: Veränderungen der Hochwasser-Saisonalität im Alpen-Karpaten-Bereich. Oben: Monat, in dem der maximale Hochwasserabfluss auftrat. Die schwarze Linie zeigt, dass sich der Zeitpunkt der Hochwasser in den letzten Jahrzehnten entlang eines Höhengradienten verschoben hat. Beobachtungsdaten von 1961 bis 2000. Unten: Geländehöhe des Längenschnittes Österreich – Slowakei.

Quelle: Parajka et al. (2009)

Einzugsgebiet: Ein zentraler Faktor der Hochwassergenese in Einzugsgebieten ist die Bodenfeuchte, da sie die Menge des Niederschlags bestimmt, die nicht infiltrieren kann und somit an der Landoberfläche abläuft und direkt zum Hochwasser beiträgt (Komma et al., 2007; Rogger et al., 2013). Das Hochwasser Juni 2013 an der Donau (Kapitel 2) hat gezeigt, wie wichtig dieser Einfluss sein kann. Da die Verdunstung stark die Bodenfeuchte beeinflusst, haben Landnutzungsänderung das Potential, Hochwasser zu verändern. Zusätzlich können die Oberflächenversiegelung durch Urbanisierung und die Umwandlung von Wald in landwirtschaftlichen Flächen die Infiltration reduzieren, letztere wegen Unterbrechung von bevorzugten Fließwegen im Boden (Makroporen).

Mit Hilfe von numerischen Modellen lassen sich die Auswirkungen von Landnutzungsänderungen auf Hochwasser simulieren (Blöschl et al., 2007). Ein typisches Beispiel für eine solche Untersuchung ist in Abbildung 10 dargestellt. Jeder Punkt in der Abbildung bezieht sich auf ein Hochwasserereignis. Für jedes Ereignis wurden zwei Simulationen durchgeführt, eine mit der realen Landnutzung und eine mit veränderter Landnutzung (entweder weniger oder mehr Waldfläche). Die Unterschiede im Hochwasserabfluss zwischen diesen beiden Simulationen wurden in Prozent aufgetragen. Die Abbildung zeigt, dass gemäß dieser Berechnungen Aufforstung die Hochwasserspitzen redu-

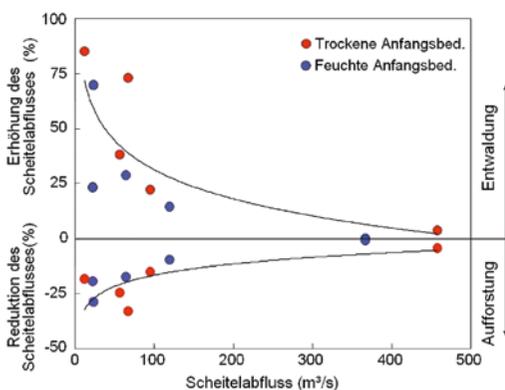


Abb. 10: Simulierte Wirkung von Aufforstung und Abholzung auf den Hochwasserabfluss für das Kampgebiet im Waldviertel (622 km² Fläche). Basis: 47% Waldfläche. Aufforstung: 86%. Entwaldung: 0% (Restfläche ist Grünland und Ackerland). Quelle: verändert nach Salazar et al. (2010)

ziert (zufolge erhöhter Infiltration, Speicherung und Verdunstung), während Abholzung die Hochwasserspitzen erhöht. Der Effekt ist etwas größer, wenn der Boden zu Beginn des Ereignisses trocken ist.

Simulationen wie in Abbildung 10 gehen davon aus, dass sich die Landnutzungsänderungen durch Veränderungen einzelner Modellparameter beschreiben lassen. Zur Verringerung der Infiltration wird beispielsweise die hydraulische Leitfähigkeit herabgesetzt, so dass der Oberflächenabfluss erhöht wird. In der Realität wird allerdings oft ein komplexes Zusammenspiel zwischen den Prozessen im Boden, der Vegetation und der Atmosphäre beobachtet (Merz and Blöschl, 2009; Gaál et al., 2012; Perdigão and Blöschl, 2014), weswegen die Modellparameter zu koppeln wären. Abbildung 11 zeigt beispielsweise, dass die Hochwasserganglinien in der Gurk Region gedämpft sind, während sie in der Bucklige Welt Region rasch reagieren mit hohen Scheitelabflüssen. Die Einzugsgebiete haben eine ähnliche Fläche, unterscheiden sich aber in den Landschaftsformen – gebirgig mit flachen Talböden und runden Kuppen im Fall der Gurk und tief eingeschnittene Täler im Fall der Buckligen Welt. In Gurk-Gebiet werden Hochwasser vor allem durch großräumige Niederschläge ausgelöst, und der Abfluss findet vorwiegend unterirdisch statt, was zur Dämpfung des Abflusssignals führt, zu geringer Erosion und verstärktem Bodenaufbau, was wiederum die Abflussreaktion verlangsamt. Im Gegensatz dazu werden in der Buckligen Welt die Hochwasser vor allem durch konvektiven Niederschlag mit hohen Intensitäten ausgelöst, wodurch die Erosion groß ist, die Bodentiefe verringert wird und die Effizienz der Gerinnenetzes erhöht wird, was wiederum die Abflussreaktion beschleunigt.

Das Beispiel zeigt, dass die Koevolution von Klima, Vegetation, Böden und Landschaftsformen die einzelnen Komponenten des Einzugsgebietssystems koppelt. Diese Koppelung findet auf unterschiedlichen Zeitskalen statt – die Abflussreaktion während eines Ereignisses im Bereich von Stunden, der Wasserhaushalt und damit die Bodenfeuchte vor Ereignisbeginn im Bereich von Monaten, die Bodenbildung und damit die Speicherfähigkeit im Bereich von Jahrzehnten oder Jahrhunderten, und schließlich die Landschaftsentwicklung, die die Geländeneigung und das Lokalklima bestimmt, im Bereich von Jahrtausenden (Abbildung 12). Dieser Feedbacks werfen interessante Forschungsfragen zum besseren Verständnis der Hochwasser verändernden Prozesse auf.

Flusssystem: Da sich die Hochwasserwellen im Flusssystem ausbreiten, werden sie von den Eigenschaften des Gerinnes und des Vorlandes beeinflusst. Der Verlust von Retentionsflächen im Vorland kann zu einer Erhöhung des Hochwasserscheitels führen. Die wichtigste Kenngröße zur Einschätzung von Veränderungen ist das Wasservolumen, das im Vorland zurückgehalten werden kann, wohingegen der Bewuchs in der Regel eine untergeordnete

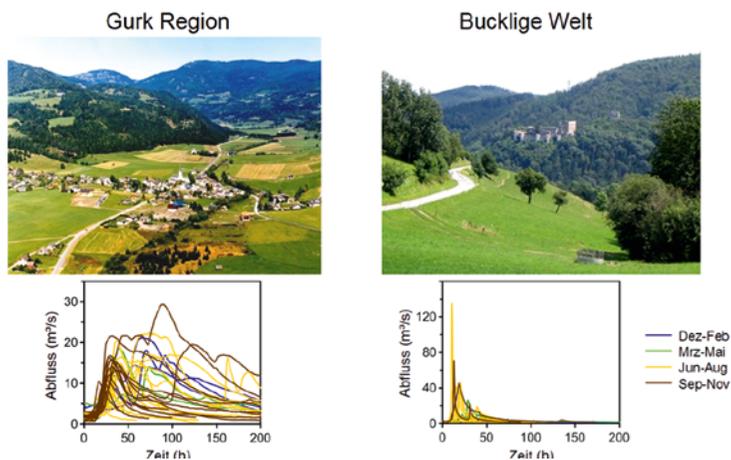


Abb. 11: Hochwasserganglinien für ein Gebiet in der Region Gurk (432 km² Gebietsfläche) (links) und in der Buckligen Welt (184 km²) (rechts) in Österreich. Die Abflussreaktion ist stark mit der Landschaftsentwicklung gekoppelt.

Quelle: Blöschl et al. (2013d)

Rolle für die Größe des Hochwassers spielt. Dieses Volumen muss im Bereich des Hochwasserscheitels zur Verfügung gestellt werden. Skublics und Rutschmann (2015) zeigten beispielsweise, dass sich der Wegfall von Rückhalteflächen in den Donauauen im Vergleich zur historischen Situation nur gering auf die Scheitelabflüsse von Hochwassern auswirkte, da das Speichervolumen schon zu Beginn des Ereignisses konsumiert wurde. Somit war die Speicherfähigkeit zum Zeitpunkt des maximalen Wasserstandes – wenn die Abflussreduzierung am nötigsten gebraucht wurde – eher gering. Gesteuerte Polder, bei denen das Wasser im Fluss kurz vor dem maximalen Wasserstand in das Vorland ausgeleitet wird, können deshalb im Vergleich zu ungesteuerten Poldern die Retentionswirkung stark erhöhen.

Die Auswirkungen von Veränderungen im Gerinne und im Vorland auf die Größe und den Ablauf von Hochwassern können gut durch zweidimensionale hydrodynamische Modelle bestimmt werden. Bei bisher üblichen Modellen traten im Uferbereich allerdings oft numerische Artefakte auf, die zu numerischen Instabilitäten und zu viel zu hohen simulierten Geschwindigkeiten führten, insbesondere bei der Simulation von flachem, komplexen Vorland. Neue numerische Schemata lösen dieses Problem durch verbesserte Interpolationsfunktionen (Horváth et al., 2015). Bisher waren auch große Rechenzeiten ein Problem, wenn die Anzahl der Rechenelemente eine Million überstieg, was für realistische Situationen notwendig sein kann. Neue Entwicklungen

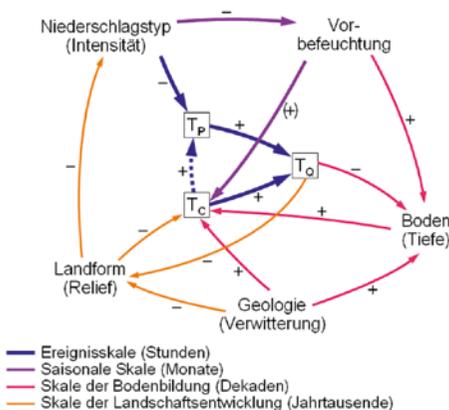


Abb. 12: Schematische Darstellung der Kopplung der Prozesse, die die Zeitskalen von Hochwasserwellen beeinflussen. Plus- und Minuszeichen geben an, ob die Kopplung positiv oder negativ ist. T_p ist die Hochwasser auslösende Niederschlagsdauer, T_c die Reaktionszeit des Gebietes und T_o die Charakteristische Zeit des Hochwasserereignisses (beispielsweise definiert als Verhältnis von Volumen und Scheitelabfluss).

Quelle: Gaál et al. (2012)

der Parallelisierung durch Nutzung von Graphikkarten (GPU) erlauben eine Steigerung der Rechengeschwindigkeiten um Größenordnungen (Horváth et al., 2015). Zudem bieten neue Visualisierungsinstrumente eine raschere und zuverlässigere Einschätzung der Überflutungssituation (Abbildung 13) und der möglichen Schutzvarianten (Ribicic et al., 2013).

Bei einem regionalen Hochwasser in einem Flussgebiet kommt es aber nicht nur auf das Ausuferungsverhalten einer bestimmten Flussstrecke an, sondern auch auf das räumliche Zusammenspiel der Einzugsgebiete. Beim Hochwasser 2013 war das räumliche Zusammenspiel ein wichtiger Faktor, der die Größe des Ereignisses mitbestimmte. Abbildung 14 zeigt die vier Hochwasserwellen der Ereignisse in Abbildung 3 am Zusammenfluss von Inn und Donau in Passau. Die Bayerische Donau (beige) weist generell eine viel stärkere Verzögerung als der Inn (blau) auf, vor allem wegen des hoch durchlässigen Untergrundes. Außergewöhnlich war beim Hochwasser 2013, dass die Welle der Bayerischen Donau relativ früh auftrat. Dies ist auf die

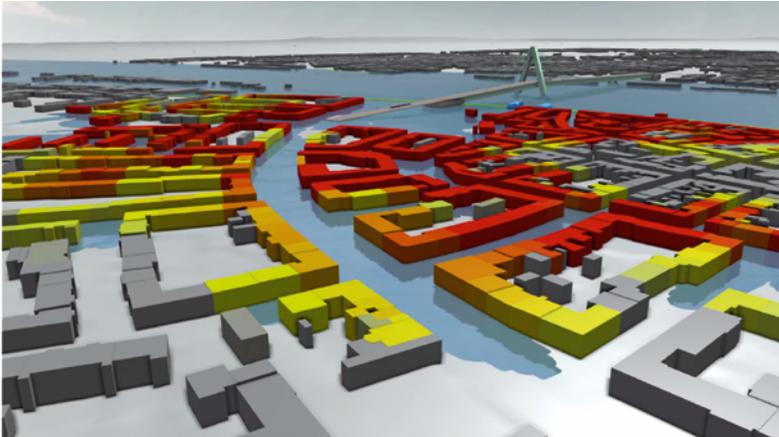


Abb. 13: Überflutungssimulation mit einem zweidimensionalen hydrodynamischen Modell. Die Gebäude wurden gemäß Einstauhöhe eingefärbt. Neue Technologien wie der Einsatz von Graphikprozessoren und neue numerische Schemata erlauben eine massive Verkürzung der Rechenzeiten.

Quelle: Horváth et al. (2015)

sehr hohe Vorbefeuchtung und auf den etwas früheren Niederschlag als im Inngbiet zurückzuführen. Normalerweise führt zuerst der Inn Hochwasser, erst viel später folgt die Bayerische Donau. Beim Hochwasser 2013 war der zeitliche Unterschied aber kleiner als bei anderen Ereignissen und die beiden Wellen überlagerten sich stärker. Eine Verschiebung der Wellenlaufzeiten kann deshalb zu komplexen, nicht-linearen Überlagerungen führen, welche die Größtabflüsse von Hochwassern erhöhen.

4. Wie werden sich die Hochwasser in der Zukunft ändern?

Ob Hochwasser in der Zukunft häufiger oder größer werden, hängt von den Veränderungen der Prozesse in der Atmosphäre, dem Einzugsgebiet und dem Flusssystem ab. Vorhersagen solcher Veränderungen erfolgen üblicherweise durch Szenarioanalysen. Sie werden meist als Projektionen bezeichnet. Dabei werden die Hochwasserprozesse für die aktuelle Situation und einen

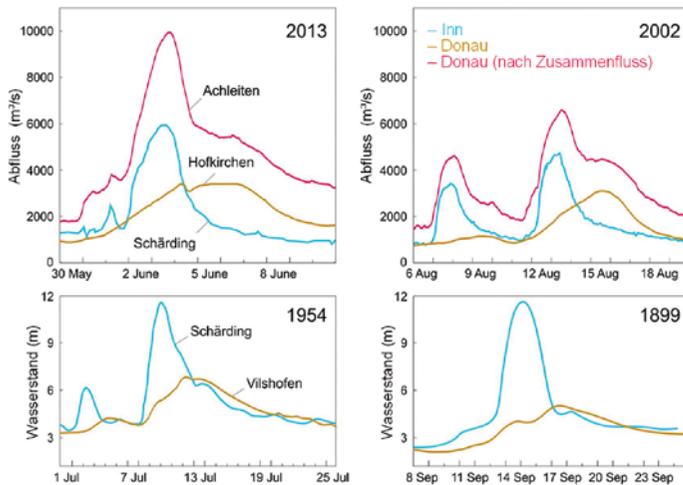


Abb. 14: Hochwasserganglinien des Inns (blau), der bayerischen Donau (beige) und der Donau nach dem Zusammenfluss (rot) bei Passau. Zu erkennen ist die wesentlich langsamere Reaktion der bayerischen Donau als die des Inns. Eine Verschiebung von Wellenlaufzeiten kann zur unerwarteten Erhöhung der Hochwasserscheitel führen.

Quelle: Blöschl et al. (2013a)

mögliche künftigen Situation (mit Veränderung) simuliert und die beiden Situationen verglichen.

Ausgangspunkt für die Szenarien sind Simulationen von globalen Klimamodellen mit verschiedenen Annahmen über zukünftige sozioökonomische Bedingungen, woraus Treibhausgas- und Aerosolemissionen abgeschätzt werden. Eine Alternative sind die „Gemeinsamen Sozioökonomischen Pfade“ (Van Vuuren et al., 2011), die direkt Annahmen über den Energiehaushalt der Atmosphäre treffen. Die Simulationsergebnisse der Klimamodelle werden dann auf die regionale Skala heruntergebrochen und als Eingangsgrößen für hydrologische Modelle verwendet, die die Häufigkeit und Größe von Hochwassern berechnen. Hall et al. (2014) gibt einen Überblick über Methoden und Ergebnisse aktueller Studien. Einige Studien legen nahe, dass eine Zunahme des Niederschlags in Nordeuropa zu häufigeren Hochwassern führt, sich hingegen die Häufigkeit der Hochwasser in Südeuropa verringert. Darüber hinaus könnte die Erwärmung zu einem Anstieg der konvektiven Niederschläge in ganz Europa führen, was sich in erhöhten Hochwassern in kleinen Einzugsgebieten widerspiegeln könnte.

Die Schwierigkeit solcher Simulationsstudien ist die große Unsicherheit des zukünftigen Niederschlags und der Annahmen, wie sich Einzugsgebiete bei Veränderungen verhalten. Blöschl und Montanari (2010) weisen darauf hin, dass in der Regel extreme Niederschläge weniger zuverlässig vorhergesagt werden können als saisonale Niederschläge, und diese sind weniger zuverlässig als die Lufttemperatur. Ein Verständnis der Rolle einzelner Einflussgrößen kann deshalb wichtiger sein, als eine Abschätzung von inhärent unsicheren Veränderungen von Hochwassern.

In der Studie von Blöschl et al. (2011) wurden deshalb die einzelnen, zu Hochwasserveränderungen führenden Mechanismen getrennt ausgewiesen. Die Grundidee besteht darin, jedem Mechanismus eine unterschiedliche Zuverlässigkeit der Aussage auf Basis einer generellen Einschätzung der vorhandenen Informationen und der Prozesse zuzuweisen. Die zuverlässigsten Aussagen werden als „harte“ Aussagen bezeichnet, die am wenigsten zuverlässig

lässigen als „weiche“ Aussagen. Vier Mechanismen werden unterschieden.

- Saisonaler Niederschlag: Zunahme des Winterniederschlags, Abnahme des Sommerniederschlags (z.B. durch Verschiebung der Zirkulationsmuster), „mittelharte Aussage“.
- Anteil konvektiver Niederschlag: Größerer Anteil (durch höhere Lufttemperatur), dadurch höhere Niederschlagsintensitäten, „weiche Aussage“.
- Schneefallgrenze: Höhere Schneefallgrenze (durch höhere Lufttemperatur), dadurch größerer Anteil flüssigen Niederschlags, „harte Aussage“.
- Schnee, Verdunstung: Frühere Schneeschmelze (wegen höherer Lufttemperatur), dadurch saisonale Verschiebung der Abflussbereitschaft. Höhere Verdunstung, dadurch Verringerung der Abflussbereitschaft, „harte Aussage“.

Damit führten Blöschl et al. (2011) Monte-Carlo-Simulationen durch für typische Verhältnisse von Niederschlag, Lufttemperatur und Abflussbildung in Österreich. Je nach Mechanismus werden erhöhte oder reduzierte Hochwasser simuliert und es gibt regionale Unterschiede (Abbildung 15). Ein deutliches Signal der Erhöhung ergeben die Berechnungen beispielsweise im Innviertel (Nordwesten Österreichs) zufolge Verschiebung der Schneefallgrenze.

Abbildung 16 links zeigt die Häufigkeiten der simulierten Hochwasser für den Ist-Zustand und die Szenarien, getrennt nach Monat des Auftretens, für die Regionen Tirol und Innviertel. In Tirol treten die Hochwasser vorwiegend im Sommer auf. In einem geänderten Klima (rote Linie) könnten die Hochwasser etwas früher auftreten aufgrund früherer Schneeschmelze als Folge der höheren Lufttemperaturen. Im Innviertel hingegen treten die Hochwasser vor allem im Winter und Frühjahr auf. Die Häufigkeit der Winterhochwasser ist in den Szenarien signifikant erhöht aufgrund einer höheren Schneefallgrenze. Dieser Effekt ist wegen der geringeren Seehöhen stärker als in den Alpen. Da die Erhöhung der Schneefallgrenze als „harte Aussage“ angesehen wird, kann den Ergebnissen für das Innviertel eine größere Aussagekraft zugewiesen werden als Veränderungen, die sich etwa durch eine Verstärkung des konvektiven Niederschlags ergeben.

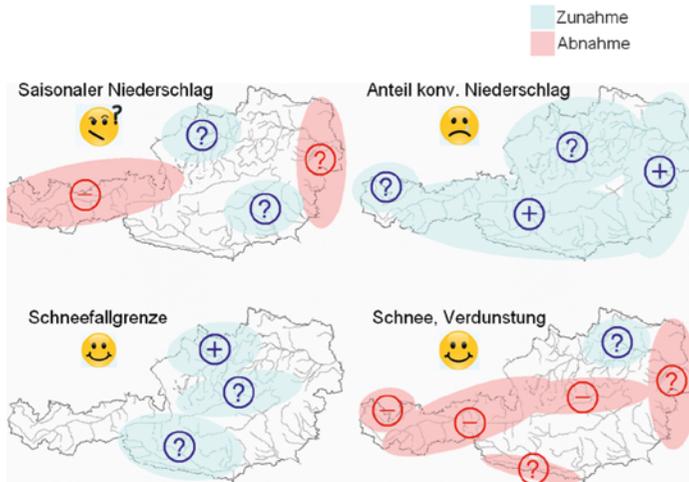


Abb. 15: Generalisierte Änderungen von Hochwassern mit einer Auftretenswahrscheinlichkeit von 1% in einem Jahr (HQ100) in Österreich, berechnet aus den Szenarienanalysen für einzelne Mechanismen. 2021–2050 im Vergleich zu 1976–2007. Der Gesichtsausdruck bei den Mechanismen bezieht sich darauf, ob die Veränderungen als „weiche“ oder „harte“ Aussagen anzusehen sind. Fragezeichen weisen geringe (nicht signifikante) Veränderungen aus.

Quelle: Blöschl et al. (2011)

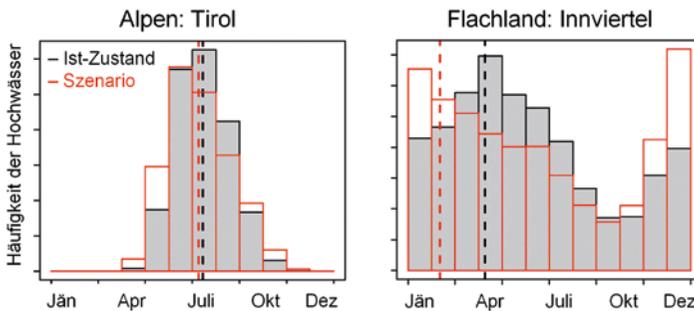


Abb. 16: Simulierte Verteilung des Auftretens der Jahreshochwässer in zwei typischen Einzugsgebieten in den Regionen Tirol (links) und Innviertel (rechts). Heutige Bedingungen (schwarz) und Zukunftsszenario mit allen vier Mechanismen (rot).

Quelle: Blöschl et al. (2011)



Der Szenarioansatz basiert auf der Annahme, dass das zukünftige System grundsätzlich genauso funktioniert wie die Vergangenheit, mit Ausnahme derjenigen Variable, die geändert wird (z. B. geändertes Klima wie in Abbildung 16, geänderte Landnutzung wie in Abbildung 10 oder Errichtung von Dämmen) (Peel und Blöschl, 2011). Sivapalan et al. (2012) weisen allerdings darauf hin, dass das keine sehr realistische Annahme ist, wenn man die nächsten Jahrzehnte oder das nächste Jahrhundert betrachtet. Änderungen im hydrologischen System haben auch Auswirkungen auf das sozio-ökonomische System und umgekehrt. Sivapalan et al. prägten den Begriff Soziohydrologie als diejenige Wissenschaft, die den Menschen als integralen Bestandteil des gesamten hydrologischen Systems betrachtet. Die Idee ist dabei, über die Quasi-Stationarität des Szenarioansatzes (wie z. B. in Abbildungen 10 und 16 angenommen) hinausgehend die Feedbacks der Langzeitdynamik explizit zu berücksichtigen. Wiederum geht es um eine Koevolution, in diesem Fall von Gesellschaft, Infrastruktur und hydrologischen Prozessen. Um die Rolle dieser Feedbacks zu veranschaulichen, entwickelten Di Baldassarre et al. (2013) und Viglione et al. (2014) ein einfaches (stilisiertes) Modell für eine hypothetische Stadt an einem Fluss. Im Wirkungsdiagramm des Modells (Abbildung 17) stellt jeder Pfeil eine Verbindung zwischen den Komponenten Wirtschaft, Technologie, Hydrologie, Politik und Gesellschaft dar. Die Komponenten werden jeweils durch eine Differentialgleichung beschrieben, die nicht-linear und gekoppelt sind. Das Modell versucht nicht, eine bestimmte Stadt zu modellieren sondern grundsätzliche Beziehungen abzubilden.

Als Beispiel zeigt Abbildung 18 simulierte Hochwasserschäden über einen Zeitraum von 200 Jahren. Das gekoppelte Modell simuliert die Entwicklung der Stadt in diesem Zeitraum, und zwar ob die Bürger sich entscheiden, in

der Nähe des Flusses zu bauen (was wirtschaftliche Vorteile hat) oder weit weg vom Fluss (wodurch Hochwasserschäden vermieden werden), und sie können sich entscheiden Hochwasserschutzdämme zu bauen (aber diese können von großen Hochwasser überflutet werden).

In Abbildung 18a wurden die Optionen darauf beschränkt, den Siedlungsbereich weit weg vom Fluss anzulegen, aber es durften keine Dämme errichtet werden, in Abbildung 18b war letzteres erlaubt. Für den Fall ohne Hochwasserschutz führt jedes Hochwasser zu einem entsprechenden Schaden. In Hochwasser reichen Perioden treten demgemäß mehr und größere Schäden auf. Für den Fall mit Hochwasserschutz werden im Modell Dämme vor allem um das Jahr 50 gebaut, die die Schäden erheblich reduzieren (im Vergleich zum oberen Szenario). Wenn die Hochwasser reichen Jahre beginnen (Jahre 80-130), haben die Bürger bereits Häuser in die Nähe der Dämme gebaut. Die Hochwasser sind aber höher als die zu diesem Zeitpunkt vorhandenen Dämme, sodass der Schaden größer ist als ohne Hochwasserschutz. Das sind hypothetische Szenarien, doch weisen sie darauf hin, dass Rückkopplungs-

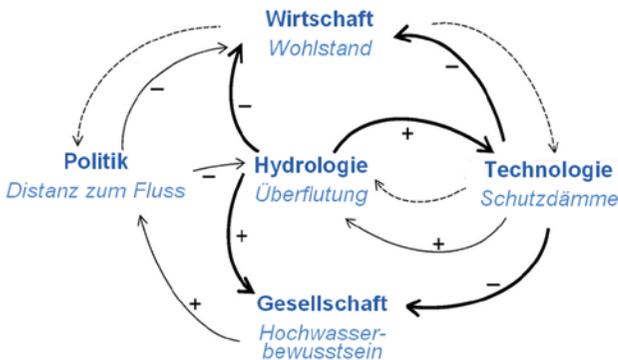


Abb. 17: Wirkungsdiagramm (Causal Loop Diagram) der Kopplung hydrologischer, wirtschaftlicher, politischer, technologischer und gesellschaftlicher Prozesse für die Überflutung einer Stadt durch Hochwasser. Dicke Pfeile zeigen direkte abrupte Koppelung, dünne Pfeile allmähliche Koppelung durch Koevolution, gestrichelte Pfeile indirekte Kontrollmechanismen.

Quelle: nach Di Baldassarre et al. (2013)

prozesse zwischen den einzelnen Komponenten des sozio-hydrologischen Systems sehr wichtig sein können.

Da das Modell nicht-linear ist, können ähnliche Anfangs- und Randbedingungen zu einer unterschiedlichen Entwicklung führen. Dies ist in Abbildung 19 beispielhaft dargestellt. Die Simulationsläufe wurden mit den gleichen Modellparametern und mit der gleichen Hochwasserwahrscheinlichkeit wiederholt. Die Simulationen unterschieden sich aber durch die Abfolge der Hochwasser. Das Beispiel zeigt, dass sich je nach der Abfolge der Hochwasser der Wohlstand der Stadt vollkommen unterschiedlich entwickeln kann. Wegen der Nichtlinearität der Gleichungen ergibt sich bei dieser Parameterwahl sogar eine Verzweigung der wahrscheinlichsten Entwicklungspfade. Das Beispiel verdeutlicht auch, dass von derartigen Modellen keine deterministischen Prognosen erwartet werden können. Das ist auch nicht das Ziel, sondern ein besseres Verständnis der zugrunde liegenden Prozesse.

Derartige Untersuchungen erlauben auch wichtige Aussagen für den konkreten Umgang mit Hochwassern. Grundsätzlich folgt dieser heute in Europa dem Paradigma des integrierten Hochwasserrisikomanagement (IFRM), das

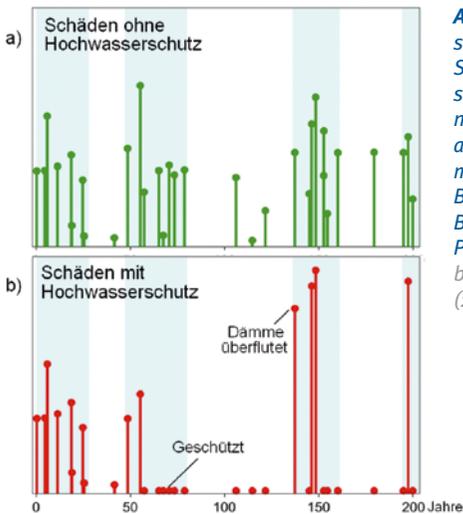


Abb. 18: Zwei Szenarien der Hochwasserschäden für eine hypothetische Stadt. (a) Die Optionen des Hochwassermanagements beinhalten Raumplanungsmaßnahmen (Distanz zum Fluss) aber keine Technologien (Schutzdämme). (b) Optionen beinhalten auch den Bau von Schutzdämmen. Hellblaue Bereiche zeigen Hochwasser reiche Perioden. Quelle: Blöschl et al. (2015), basierend auf Di Baldassarre et al. (2013) und Viglione et al. (2014)

das Problem des Hochwasserrisikos in umfassender Weise behandelt (Merz, 2006; EU, 2007). Das Risikomanagement kann darauf abzielen, die Gefahr zu reduzieren (z. B. durch den Bau von Poldern), oder die Anfälligkeit bzw. Vulnerabilität (z. B. durch Bauverbot in Risikogebieten). Notfallpläne, Sensibilisierung der Öffentlichkeit und Hochwasserwarnungen zählen auch zu den Instrumenten des Risikomanagements.

Überlegungen zur Prognostizierbarkeit zukünftiger Hochwasser wie in den Abbildungen 19 aber auch 16 weisen darauf hin, dass nicht alle Eventualitäten der Zukunft planbar sind. Deswegen sind robuste Instrumente des Risikomanagement wichtig, die unabhängig von den Ursachen, der Größe und dem Charakter zukünftiger Hochwasserereignisse eine positive Wirkung entfalten (Wilby und Dessai, 2010; Blöschl et al., 2013c). Derartige Instrumente verringern die Vulnerabilität, indem ausgehend von der lokalen Ebene von Haushalten und Gemeinden die Faktoren und Bedingungen untersucht werden, die eine erfolgreiche Bewältigung von Hochwasserrisiken ermöglichen, auch für Situationen, in denen die einzelnen Faktoren des Hochwasserrisikos nicht im Detail bekannt sind oder prognostiziert werden können.

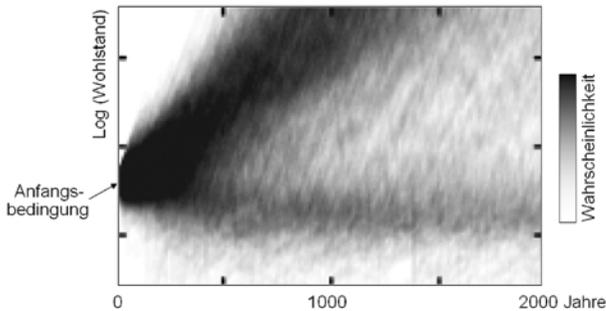


Abb. 19: Wohlstand einer hypothetischen Stadt basierend auf vielen Szenarien, für die die gleiche Wahrscheinlichkeit aber eine unterschiedliche Abfolge der Hochwasser angenommen wurde. Die Grauschattierung zeigt, wie wahrscheinlich ein bestimmter Wohlstand in einem bestimmten Jahr ist. Wegen der Nichtlinearität der Gleichungen ergibt sich eine Bifurkation der Entwicklungspfade.

Quelle: Viglione et al. (2014)

5. Schlussfolgerungen

In diesem Artikel wurde diskutiert, ob sich Flusshochwasser in der Vergangenheit verändert haben. Die Größe und Häufigkeit von Hochwassern haben sich in der Tat auf eine komplexe Weise verändert. In Nordwesteuropa etwa haben die Hochwasser in den letzten Jahrzehnten deutlich zugenommen. Allerdings weisen die Vermögenswerte in hochwassergefährdeten Gebieten oft eine noch prägnantere Dynamik auf, sodass die Zunahme von Schäden meist durch letztere dominiert wird. Ein interessantes Ergebnis ist auch, dass Hochwasser nicht gleichmäßig im Laufe der Geschichte aufgetreten sind, sondern in Clustern hochwasserarmer und hochwasserreiche Perioden. Das genaue Verständnis der Ursachen dieser Clusterbildung erfordert weitere Forschung.



Dieser Beitrag untersuchte ferner, welche Prozesse zu einer Veränderung von Hochwassern beitragen. Die atmosphärischen Zirkulationsmuster beeinflussen regionale Niederschläge und die Erwärmung kann zu höheren konvektiven Niederschlägen führen. Auf die Hochwasser wirken sich aber auch Bodenfeuchte und Schneeschmelze ganz erheblich aus, die mit Hilfe des zeitlichen Auftretens der Hochwasser innerhalb des Jahres (Saisonalität) untersucht werden können. Bei der Beurteilung der Veränderungen ist zu beachten, dass das System Klima, Vegetation, Böden und Landschaftsformen durch seine Koevolution gekoppelt ist, und einfache Szenarienansätze deswegen zu kurz greifen können. Die Auswirkungen von Veränderungen im Flusssystem sind besser modellmäßig greifbar, wobei aber auch hier interessante Interdependenzen etwa am Zusammenfluss von Gewässern auftreten können.

Der Szenarienansatz zur Prognose zukünftiger Änderungen von Hochwassern zufolge Klimawandel unterliegt großen Unsicherheiten. Deswegen ist es sinnvoll, die zu Hochwasserveränderungen führenden Mechanismen getrennt auszuweisen und sie jeweils in Hinblick auf ihre Aussagekraft zu beurteilen, z. B. durch eine Unterscheidung von ‚harten‘ und ‚weichen‘ Aussagen. Für Vorhersagezeiträume von Jahrzehnten oder Jahrhunderten ist es zusätzlich wichtig, die langfristige Rückkopplungen zwischen dem hydrologischen System und dem gesellschaftlichen System zu berücksichtigen, wie dies durch die Soziohydrologie vertreten wird. Das bedeutet eine Abkehr von den derzeit weit verbreiteten Szenarien hin zu dynamischen Ansätzen. Für das Hochwasserrisikomanagement bedeutet dies eine Ergänzung der derzeit verwendeten Instrumente durch robuste Ansätze, die unabhängig von den Ursachen, der Größe und dem Charakter zukünftiger Hochwasserereignisse eine positive Wirkung entfalten, um in Zeiten des Globalen Wandels für zukünftige Hochwasser gerüstet zu sein. Wie im Zitat aus dem Economist am Anfang dieses Beitrages angeregt, ist ein Umdenken erforderlich, von einem auf quasi-statischen Szenarien basierenden Verständnis der Welt, hin zu einem Verständnis als ein gekoppeltes dynamisches System, bei dem Menschen eine essentielle Rolle spielen.

6. Danksagung

Herzlichen Dank sei an dieser Stelle allen Kolleginnen und Kollegen ausgesprochen, die diese Forschung über Jahre mitgestaltet haben. Vom Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie der TU Wien sind das insbesondere Ladislav Gaál, Julia Hall, Andrea Kiss, Jürgen Komma, Thomas Nester, Juraj Parajka, Rui A. P. Perdigão, Lenka Plavcová, Magdalena Rogger, José Luis Salinas, Alberto Viglione. Von den vielen Kooperationspartnern möchte ich hier besonders Bruno Merz für die fruchtbare Zusammenarbeit danken. Meinem Mentor Dieter Gutknecht danke ich für die jahrelange wohlwollende Unterstützung. Die hier zusammengefasste Forschung wurde u.a. gefördert durch einen ERC Advanced Grant (no 291152), IMPALA (FP7-PEOPLE, 301953), FWF (Projekte 1219W, P23723), und ÖAW (Vorhersagbarkeit; Gebirgshochwasser). Abschließend dan-

ke ich dem GFZ für die Unterstützung und der Helmholtz Gemeinschaft für die Verleihung des Helmholtz International Fellow Awards. Teile des vorliegenden Beitrages basieren auf der Publikation Blöschl et al. (2015).

7. Literatur

- Baker, V. R., Webb, R. H., House, P. K. (2002):** *The scientific and societal value of paleoflood hydrology.* - In: House, P. K., Webb, R. H., Baker, V. R., Levish, D. R. (Eds.), *Ancient Floods, Modern Hazards: Principles and Applications of Paleoflood Hydrology*, (Water science and application ; 5), Washington, DC: American Geophysical Union, p. 1-19. DOI: <http://doi.org/10.1029/WS005p0001>
- Barredo, J. I. (2009):** Normalised flood losses in Europe: 1970–2006. - *Natural Hazards and Earth System Sciences (NHES)*, 9, 1, p. 97–104. DOI: <http://doi.org/10.5194/nhess-9-97-2009>
- Blöschl, G., Gaál, L., Hall, J., Kiss, A., Komma, J., Nester, Th., Parajka, J., Perdigão, R. A. P., Plavcová, L., Rogger, M., Salinas, J. L., Viglione, A. (2015 online first):** Increasing river floods - fiction or reality?. - *WIREs Water*. DOI: <http://doi.org/10.1002/wat2.1079>
- Blöschl, G., Montanari, A. (2010):** Climate change impacts - throwing the dice?. - *Hydrological Processes*, 24, 3, 374–381. DOI: <http://doi.org/10.1002/hyp.7574>
- Blöschl, G., Viglione, A., Merz, R., Parajka, J., Salinas, J., Schöner, W. (2011):** Auswirkungen des Klimawandels auf Hochwasser und Niederwasser. - *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 63, 1-2, p. 21- 30. DOI: <http://doi.org/10.1007/s00506-010-0269-z>
- Blöschl, G., Ardoin-Bardin, S., Bonell, M., Doringner, M., Goodrich, D., Gutknecht, D., Matamoros, D., Merz, B., Shand, P., Szolgay, J. (2007):** At what scales do climate variability and land cover change impact on flooding and low flows? - *Hydrological Processes*, 21, 9, p. 1241-1247. DOI: <http://doi.org/10.1002/hyp.6669>
- Blöschl, G., Sivapalan, M., Wagener, T., Viglione, A., Savenije, H. (Eds.) (2013d):** *Runoff Prediction in Ungauged Basins: Synthesis across Processes, Places and Scales*, Cambridge: Cambridge University Press, 465 p.
- Blöschl, G., Nester, T., Komma, J., Parajka, J., Perdigão, R. A. P. (2013a):** The June 2013 flood in the Upper Danube basin, and comparisons with the 2002, 1954 and 1899 floods. - *Hydrology and Earth System Sciences*, 17, 12, p. 5197-5212. DOI: <http://doi.org/10.5194/hess-17-5197-2013>
- Blöschl, G., Nester, T., Komma, J., Parajka, J., Perdigão, R. A. P. (2013b):** Das Juni-Hochwasser 2013 – Analyse und Konsequenzen für das Hochwasserrisikomanagement. - *Österreichische Ingenieur- und Architekten-Zeitschrift*, 158, 1-12, p. 141–152.

- Blöschl, G., Viglione, A., Montanari, A. (2013c):** *Emerging Approaches to Hydrological Risk Management in a Changing World*. - In: Hossain, F. (Ed.), *Vulnerability of water resources to climate, (Climate Vulnerability: Understanding and Addressing Threats to Essential Resources ; 5)*, Amsterdam [u.a.] : Elsevier, p. 3–10. DOI: <http://doi.org/10.1016/B978-0-12-384703-4.00505-0>
- Brázdil, R., Kundzewicz, Z. W., Benito, G., Demarée, G., Macdonald, N., Roald, L. A. (2012):** *Historical Floods in Europe in the Past Millennium*. - In: Kundzewicz, Z. W. (Ed.), *Changes in Flood Risk in Europe, (IAHS special publication; 10)*, Wallingford: IAHS Press, p. 121-166.
- Di Baldassarre, G., Montanari, A., Lins, H., Koutsoyiannis, D., Brandimarte, L., Blöschl, G. (2010):** *Flood fatalities in Africa: From diagnosis to mitigation*. - *Geophysical Research Letters*, 37, 22, L22402. DOI: <http://doi.org/10.1029/2010GL045467>
- Di Baldassarre, G., Viglione, A., Carr, G., Kuil, L., Salinas, J. L., Blöschl, G. (2013):** *Socio-hydrology: conceptualising human-flood interactions*. - *Hydrology and Earth System Sciences*, 17, 8, p. 3295–3303. DOI: <http://doi.org/10.5194/ess-17-3295-2013>
- European Parliament, Council of the European Union (2007):** *Directive 2007/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2007 on the assessment and management of flood risks*. - *Official Journal of the European Union*, 50, L 288, p. 27-34.
- Gaál, L., Szolgay, J., Kohnová, S., Parajka, J., Merz, R., Viglione, A., Blöschl, G. (2012):** *Flood timescales: Understanding the interplay of climate and catchment processes through comparative hydrology*. - *Water Resources Research*, 48, 4, W04511. DOI: <http://doi.org/10.1029/2011WR011509>
- Hall, J., Arheimer, B., Borga, M., Brázdil, R., Claps, P., Kiss, A., Kjeldsen, T. R., Kriaušienė, J., Kundzewicz, Z. W., Lang, M., Llasat, M. C., Macdonald, N., McIntyre, N., Mediero, L., Merz, B., Merz, R., Molnar, P., Montanari, A., Neuhold, C., Parajka, J., Perdigão, R. A. P., Plavcová, L., Rogger, M., Salinas, J. L., Sauquet, E., Schär, C., Szolgay, J., Viglione, A., Blöschl, G. (2014):** *Understanding flood regime changes in Europe: a state-of-the-art assessment*. - *Hydrology and Earth System Sciences*, 18, 7, p. 2735-2772. DOI: <http://doi.org/10.5194/hess-18-2735-2014>
- Horváth, Z., Waser, J., Perdigão, R. A. P., Konev, A., Blöschl, G. (2015):** *A two-dimensional numerical scheme of dry/wet fronts for the Saint-Venant system of shallow water equations*. - *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 77, 3, p. 159–182. DOI: <http://doi.org/10.1002/flid.3983>
- Kjeldsen, T., Macdonald, N., Lang, M., Mediero, L., Albuquerque, T., Bogdanowicz, E., Brázdil, R., Castellarin, A., David, V., Fleig, A., Gül, G., Kriaciuniene, J., Kohnová, S., Merz, B., Nicholson, O., Roald, L., Salinas, J., Sarauskienė, D., Šraj, M., Strupczewski, W., Szolgay, J., Toumazis, A., Vanneville, W., Veijalainen, N., Wilson, D. (2014):** *Documentary evidence of past floods in Europe and their utility in flood frequency estimation*. - *Journal of Hydrology*, 517, p. 963-973. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.06.038>
- Komma, J., Reszler, C., Blöschl, G., Haiden, T. (2007):** *Ensemble prediction of floods - catchment non-linearity and forecast probabilities*. - *Natural Hazards and Earth System Sciences (NHES)*, 7, 4, 431-444. DOI: <http://doi.org/10.5194/nhess-7-431-2007>

- Kreibich, H., Bubeck, P., Van Vliet, M., De Moel, H. (2015 online first):** A review of damage-reducing measures to manage fluvial flood risks in a changing climate. - *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*. DOI: <http://doi.org/10.1007/s11027-014-9629-5>
- Merz, B. (2006):** Hochwasserrisiken: Grenzen und Möglichkeiten der Risikoabschätzung, Stuttgart: Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, 334 p.
- Merz, B., Aerts, J., Arnbjerg-Nielsen, K., Baldi, M., Becker, A., Bichet, A., Blöschl, G., Bouwer, L. M., Brauer, A., Cioffi, F., Delgado, J. M., Gocht, M., Guzzetti, F., Harrigan, S., Hirschboeck, K., Kilsby, C., Kron, W., Kwon, H.-H., Lall, U., Merz, R., Nissen, K., Salvatti, P., Swierczynski, T., Ulbrich, U., Viglione, A., Ward, P. J., Weiler, M., Wilhelm, B., Nied, M. (2014):** Floods and climate: emerging perspectives for flood risk assessment and management. - *Natural Hazards and Earth System Sciences (NHES)*, 14, 7, p. 1921-1942. DOI: <http://doi.org/10.5194/nhess-14-1921-2014>
- Merz, B., Kreibich, H., Schwarze, R., Thielen, A. (2010):** Review article 'Assessment of economic flood damage'. - *Natural Hazards and Earth System Sciences (NHES)*, 10, 8, p. 1697-1724. DOI: <http://doi.org/10.5194/nhess-10-1697-2010>
- Merz, B., Vorogushyn, S., Uhlemann, S., Delgado, J., Hundecha, Y. (2012):** HESS Opinions, More efforts and scientific rigour are needed to attribute trends in flood time series'. - *Hydrology and Earth System Sciences*, 16, 5, p. 1379-1387. DOI: <http://doi.org/10.5194/hess-16-1379-2012>
- Merz, R., Blöschl, G. (2003):** A process typology of regional floods. - *Water Resources Research*, 39, 12, 1340. DOI: <http://doi.org/10.1029/2002WR001952>
- Merz, R., Blöschl, G. (2009):** A regional analysis of event runoff coefficients with respect to climate and catchment characteristics in Austria. - *Water Resources Research*, 45, 1, W01405. DOI: <http://doi.org/10.1029/2008WR007163>
- Parajka, J., Kohnová, S., Bálint, G., Barbu, M., Borga, M., Claps, P., Cheval S., Dumitrescu, A., Gaume, E., Hlavová, K., Merz, R., Pfaundler, M., Stancalie, G., Szolgay, J., Blöschl, G. (2010):** Seasonal characteristics of flood regimes across the Alpine-Carpathian range. - *Journal of Hydrology*, 394, 1-2, p. 78-89. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.05.015>
- Parajka, J., Kohnová, S., Merz, R., Szolgay, J., Hlavcová, K., Blöschl, G. (2009):** Comparative analysis of the seasonality of hydrological characteristics in Slovakia and Austria. - *Hydrological Sciences Journal*, 54, 3, p. 456 - 473. DOI: <http://doi.org/10.1623/hysj.54.3.456>
- Peel, M. C., Blöschl, G. (2011):** Hydrologic modelling in a changing world. - *Progress in Physical Geography*, 35, 2, p. 249-261. DOI: <http://doi.org/10.1177/0309133311402550>
- Perdigão, R. A. P., Blöschl, G. (2014):** Spatiotemporal flood sensitivity to annual precipitation: Evidence for landscape-climate coevolution. - *Water Resources Research*, 50, 7, p. 5492-5509. DOI: <http://doi.org/10.1002/2014WR015365>
- Pires, C. A. L., Perdigão, R. A. P. (2015):** Non-Gaussian interaction information: estimation, optimization and diagnostic application of triadic wave resonance. - *Nonlinear Processes in Geophysics*, 22, 1, p.87-108. DOI: <http://doi.org/10.5194/npg-22-87-2015>

- Ribicic, H., Waser, J., Fuchs, R., Blöschl, G., Gröller, E. (2013):** Visual analysis and steering of flooding simulations. - *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 19, 6, p. 1062-1075. DOI: <http://doi.org/10.1109/TVCG.2012.175>
- Rogger, M., Viglione, A., Derx, J., Blöschl, G. (2013):** Quantifying effects of catchments storage thresholds on step changes in the flood frequency curve. - *Water Resources Research*, 49, 10, p. 6946–6958. DOI: <http://doi.org/10.1002/wrcr.20553>
- Salazar, S., Frances, F., Komma, J., Blume, T., Francke, T., Bronstert, A., Blöschl, G. (2012):** A comparative analysis of the effectiveness of flood management measures based on the concept of ‚retaining water in the landscape‘ in different European hydro-climatic regions. - *Natural Hazards and Earth System Sciences (NHES)*, 12, 11, p. 3287-3306. DOI: <http://doi.org/10.5194/nhess-12-3287-2012>
- Schmocker-Fackel, P., Naef, F. (2010):** Changes in flood frequencies in Switzerland since 1500. - *Hydrology and Earth System Sciences*, 14, 8, p. 1581–1594. DOI: <http://doi.org/10.5194/hess-14-1581-2010>
- Schröter, K., Kunz, M., Elmer, F., Mühr, B., Merz, B. (2015):** What made the June 2013 flood in Germany an exceptional event? A hydro-meteorological evaluation. - *Hydrology and Earth System Sciences*, 19, p. 309-327. DOI: <http://doi.org/10.5194/hess-19-309-2015>
- Sivapalan, M., Savenije, H. H. G., Blöschl, G. (2012):** Socio-hydrology: A new science of people and water. - *Hydrological Processes*, 26, 8, p. 1270–1276. DOI: <http://doi.org/10.1002/hyp.8426>
- Skublics, D., Rutschmann, P. (2015):** Progress in natural flood retention at the Bavarian Danube. - *Natural Hazards*, 75, 1, Suppl., p. 51-67. DOI: <http://doi.org/10.1007/s11069-014-1148-x>
- Szolgayová, E., Laaha, G., Blöschl, G., Bucher, C. (2014):** Factors influencing long range dependence in streamflow of European rivers. - *Hydrological Processes*, 28, 4, p. 1573-1586. DOI: <http://doi.org/10.1002/hyp.9694>
- Van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G. C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J.-F., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, S. J., Rose, S. K. (2011):** The representative concentration pathways: an overview. - *Climatic Change*, 109, 1-2, p. 5-31. DOI: <http://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>
- Viglione A., Rogger, M. (2015):** Flood processes and hazards. - In: Paron, P., Di Baldassarre, G. (Eds.), *Hydro-Meteorological Hazards, Risks, and Disasters*, (Hazards and disasters series), Amsterdam [u.a.] : Elsevier, p. 3-33. DOI: <http://doi.org/10.1016/B978-0-12-394846-5.00001-1>
- Viglione, A., Di Baldassarre, G., Brandimarte, L., Kuil, L., Carr, G., Salinas, J. L., Scolobig, A., Blöschl, G. (2014):** Insights from socio-hydrology modelling on dealing with flood risk - roles of collective memory, risk-taking attitude and trust. - *Journal of Hydrology*, 518, Part A, p. 71-82. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.01.018>
- Wilby, R. L., Dessai, S. (2010):** Robust adaptation to climate change. - *Weather*, 65, 7, p. 180–185. DOI: <http://doi.org/10.1002/wea.543>



Zur Person:

Kontakt:

**Institute of Hydraulic Engineering and
Water Resources Management**

Vienna University of Technology (TU Wien)

E-mail: bloeschl@hydro.tuwien.ac.at

www.waterresources.at

Education

- **Senior doctorate** (Habilitation), Hydrology, Vienna University of Technology (1997)
- **PhD**, Hydrology with honours, Vienna University of Technology (Advisor: Dieter Gutknecht), (1990)
- **Dipl.-Ing.**, Civil Engineering with honours, Vienna University of Technology (1985)

Awards and Honours (selection)

- **Named Boussinesq Lecturer:** Royal Academy of Sciences, Amsterdam, the Netherlands
- **International Hydrology Prize:** International Association of Hydrological Sciences (IAHS), UK
- **ERC Advanced Grant Laureate:** European Research Council, Brussels
- **Fellow:** German Academy of Science and Engineering (acatech) (one of the few foreign fellows of the Academy, and only hydrology member), Berlin, Germany

- **Union Service Award:** European Geosciences Union, Katlenburg, Germany (2009)

- **Fellow:** American Geophysical Union (AGU), Washington DC, USA

Leadership (selection)

- **President:** European Geosciences Union (EGU), (2013-2015)
- **President Elect:** European Geosciences Union (EGU), (2012-2013)
- **Member:** National Committee of Geo-Hydro-Sciences, Austrian Academy of Sciences, (2012-present)
- **Member:** Commission for Interdisciplinary Ecological Studies, Austrian Academy of Sciences, (2013-present)
- **Chair:** Scientific Advisory Council, German Federal Institute of Hydrology (BfG), (2011-present)
- **President:** International Commission on Water Resources Systems, IAHS, (2009-2013)

ISSN (Print) 2199-8884
ISSN (Online) 2199-8892

DOI: <http://doi.org/10.2312/GFZ.LECT.002>

Soweit nicht anders gekennzeichnet, stehen die Texte und Bilder in diesem Buch unter einer Creative Commons Lizenz Namensnennung – Weitergabe unter gleichen Bedingungen 3.0 Deutschland



www.gfz-potsdam.de